

A01-002 非平衡量子系の輸送ダイナミクス

大阪大学大学院理学研究科 小林研介
慶応義塾大学理工学部 齊藤圭司
東京大学大学院工学系研究科 沙川貴大

微細加工技術によって作製される極小の固体素子においては、平衡状態から非平衡状態までを連続的に制御できるため、非平衡量子系を定量的に取り扱える理想的な舞台である。我々の班では、このような固体素子を主たる舞台として、非平衡ダイナミクスを取り扱う方法論の創出を目指している。本年度の主たる成果は以下の通りである。

超高移動度量子ポイントコンタクトにおける電流雑音の精密測定

半導体二次元電子系に作成される量子ポイントコンタクトと呼ばれる素子においては、形成される量子チャネルの本数と透過率を自在に制御することが可能であるため、理想的な量子輸送過程を実現することが可能である。小林らは、京都大学、パリ南大学、ETH チューリッヒとの共同研究において、量子ポイントコンタクトにおける電流雑音の高精度測定を行った。反射率がゼロであるような完全に理想的な量子チャネルが形成されている状況においても、ショット雑音が完全には消失しないことを見出した。これは、量子チャネルにおける電子加熱の効果によるものとして説明された(1)。

スピン波におけるスネルの法則

近年、磁性体における典型的な励起状態であるスピン波を用いてジュール損失の小さい効率の良い素子を作ろうという機運が高まっている。スピン波を利用するにはスピン波の従う法則を明らかにする必要がある。スピン波も波の一種なので、光の進行を記述するスネルの法則がスピン波に適用できることが期待されるが、実験的に実証されたことはなかった。小林らは、京都大学、レーゲンスブルグ大学、ペルージャ大学との共同研究により、スピン波の屈折現象を観測することに成功した(2)。これによりスピン波を利用したデバイスデザインが可能となることが期待される。本成果は、APS のサイトでハイライト (2016年7月12日付 *Synopsis*) された他、*Nature Physics* 誌でも紹介された (*Nature Physics* **12**, 723 (2016))。

熱機関における仕事率と熱効率に関する厳密なトレードオフ関係

齊藤は、以前、オンサーガー行列を使った形式的な議論から、時間反転対称性を破る系ではカルノー効率と有限仕事率の共存が許される可能性があることを指摘した。それ以来、熱効率と仕事率に関するトレードオフ関係に関して多くの研究が様々な角度からなされた。今回齊藤らは、マルコフなダイナミクスにおいて、ほぼ全ての熱機関に当てはまる厳密なトレードオフ関係式を導出することに成功した(3)。この関係式によれば、時間反転対称性の有る無しに関わらずカルノー効率は仕事率の消失を意味する。これは、熱力学において時間軸での厳密な原理が与えられたことに相当し、今後の非平衡熱力学研究の基礎になりえる重要性を持つ。

1 粒子系の遅い拡散現象における自己平均効果の厳密解析

細胞内のタンパク質の拡散などが近年観測され始め、動的な挙動が生体内でどのような役目を果たしているかが分かってきている。このような実験で分かってきていることは、細胞内ではポテンシャルが乱れおり、タンパク質の拡散が非常に遅いことである。齊藤はこのような状況を念頭に置き、クエンチされたランダムポテンシャル系における拡散現象を厳密に解析した。ポテンシャルの深さの分布をベキ分布にした場合、指数に応じて拡散が変わることを厳密に示した。また、拡散係数が一意的に決まらない領域が存在すること、そのときの拡散係数の分布関数が、逆レビー分布で与えられることを厳密に示した(4)。

エントロピー生成に関する時間方向の統計性

完全計数統計などでは、一定の観測時間内にどれくらいのエントロピーが発生するかを考える。このような観測は、メゾスケールの電気伝導実験では一定時間に電流を測ることによってなされてきており、電流ゆらぎの定量的理解につながっている。齊藤は、これまでの計数統計を踏まえ、逆の過程を考えた。つまり、目標となるエントロピーを決め、それに至るまでの時間の分布を考えるのである。これはつまるところエントロピーに関する First Passage Time distribution に相当する。幾つかの例題を通して、普遍的な分布を求めた(5)。

情報熱機関における線形非平衡熱力学の構築

沙川らは、情報流によって駆動される熱機関において、線形非平衡熱力学が情報流を含む形で定式化でき、さらにオンサーガ相反定理が「情報流」「情報アフィニティ」に対しても成立することを明らかにした。とくに、Schnakenberg のネットワーク理論とグラフ縮約の手法を活用することで、一般的なマルコフ過程で記述される自律的な熱機関において情報を含むオンサーガ相反定理を証明することができた。これは線形非平衡熱力学においても情報と熱力学量を対等に扱うことができることを示す原理的に重要な結果であると言える。さらに、得られたオンサーガ相反定理を応用して、パワー（単位時間あたりの仕事率）が最大になるときの情報熱力学効率に上限があることを明らかにした(6)。

参考文献

- (1) T. Muro, Y. Nishihara, S. Norimoto, M. Ferrier, T. Arakawa, K. Kobayashi, T. Ihn, C. Rössler, K. Ensslin, C. Reichl, and W. Wegscheider, *Phys. Rev. B*, **93**, 195411 (2016).
- (2) J. Stigloher, M. Decker, H. S. Körner, K. Tanabe, T. Moriyama, T. Taniguchi, H. Hata, M. Madami, G. Gubbiotti, K. Kobayashi, T. Ono, and C. H. Back, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 037204 (2016).
- (3) N. Shiraishi, K. Saito, and H. Tasaki, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 190601 (2016).
- (4) T. Akimoto, E. Barkai, and K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 180602 (2016).
- (5) K. Saito and A. Dhar, *Europhys Letters* **114**, 50004 (2016).
- (6) S. Yamamoto, S. Ito, N. Shiraishi, and T. Sagawa, *Physical Review E* **94**, 052121 (2016).